

# 南京主城区行道树生态效益空间分异及驱动机制研究

## Research on the Spatial Differentiation and Driving Mechanism of Ecological Benefits of Roadside Trees in the Main Urban Area of Nanjing

郝雨<sup>1,2</sup> 孙圆<sup>1,3\*</sup> 郑光<sup>2</sup> 陈文霞<sup>4</sup> 许楷茗<sup>1,5</sup> 谭露<sup>1,2</sup> 纪北京<sup>1,2</sup>  
HAO Yu<sup>1,2</sup> SUN Yuan<sup>1,3\*</sup> ZHENG Guang<sup>2</sup> CHEN Wenxia<sup>4</sup> XU Kaiming<sup>1,5</sup> TAN Lu<sup>1,2</sup> JI Beijing<sup>1,2</sup>

(1.南京林业大学林草学院、水土保持学院, 南京 210037; 2.南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023; 3.南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 南京 210037; 4.南京园林科学研究所, 南京 210042; 5.兰州大学生态学院, 兰州 730000)

(1. College of Forestry and Grassland, College of Soil and Water Conservation, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu, China, 210037; 2. School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu, China, 210023; 3. Southern Modern Forestry Collaborative Innovation Center, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu, China, 210037; 4. Nanjing Institute of Landscape Science, Nanjing, Jiangsu, China, 210042; 5. School of Ecology, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu, China, 730000)

文章编号: 1000-0283(2026)03-0131-11

DOI: 10.12193/j.laing.20250526001

中图分类号: TU986

文献标志码: A

收稿日期: 2025-05-26

修回日期: 2025-08-19

### 摘要

随着中国城市的快速扩张和发展,城市绿地尤其是道路的空间形态正在变得越来越复杂。各种地理因素影响生态效益的产出,对植被培育和保护的提出了多样化的要求。为实现这一目标,结合i-Tree模型和地理探测器分析,研究中国的孑遗树种——银杏,它是中国城市行道树的常用树种。为评估银杏生态效益在街道尺度上的空间异质性,使用i-Tree模型计算了银杏的5种生态效益。此外,对划分为三环的研究区行道单株银杏生态效益进行了热点分析。最后,使用Geo-detector模型计算了10个地理因子对三环内银杏生态效益的影响。结果表明,研究区内银杏生态效益贡献排序为:美学效益>雨水截流>节能>二氧化碳吸收>空气质量改善。银杏的生态效益模式表现出明显的空间异质性,且有明显的高值区和低值区。此外,土壤类型、道路到水体的最短距离和道路宽度也是影响树木生态效益的重要驱动因素。为科学规划银杏树栽培和管理提供了参考。

### 关键词

生态效益; i-Tree Eco; 地理探测器; 城市树木; 银杏

### Abstract

With the rapid expansion and optimization of Chinese cities, the spatial patterns of urban green spaces, particularly roads, have undergone significant changes. These changes are becoming increasingly complex due to various factors, particularly those influenced by geography. Various geographical factors affect the output of ecological benefits and impose diverse demands on vegetation cultivation and conservation. To achieve this goal, we incorporated the i-Tree model and geodetector analysis to investigate *Ginkgo biloba*, a relic native tree species in China and a common urban street tree. To specify the spatial heterogeneity of the ecological benefits of *G. biloba* at the street scale, we used the i-Tree model to calculate five ecological benefits of *G. biloba*. Furthermore, hotspot analysis was conducted on the ecological benefits of individual street ginkgo trees within the study area, divided into three ring zones. Finally, the geodetector model was used to calculate the impact of 10 factors on the ecological benefits of *G. biloba* in the three urban areas. The results indicated that the ecological benefits of Ginkgo biloba in the research area are ranked as follows: aesthetic benefits > rainwater interception benefits > energy conservation benefits > carbon dioxide absorption benefits > air quality improvement benefits. The ecological benefit pattern of *G. biloba* exhibited significant spatial heterogeneity, with distinct high and low value areas that were statistically significant. Furthermore, soil type, the shortest distance from the road to the water body, and road width were significant determinants of the trees' ecological benefits. This study provides valuable insights into the prudent planning of Ginkgo tree cultivation and can assist decision-makers in designing eco-friendly urban environments suitable for the tree species. Notably, our study method can be adapted to other tree species and urban areas outside China, thereby demonstrating global applicability.

### Keywords

ecological benefits; i-Tree Eco; Geo-detector; urban forests; *Ginkgo biloba*

### 郝雨

2002年生/女/山西吕梁人/本科/研究方向为城市森林

### 孙圆

1976年生/女/北京人/博士/副教授、硕士生导师/研究方向为森林经营评价与可持续发展

### 郑光

1982年生/男/山西长治人/博士/教授、博士生导师/研究方向为植被生态遥感

\*通信作者 (Author for correspondence)

E-mail: yuan.sun@njfu.edu.cn

### 基金项目:

国家重点研发计划项目(编号: 2023YFD220170402); 南京林业大学大学生实践创新训练计划项目“基于激光数据的南京市行道树健康评价”(编号: 202210298074Y); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(编号: PAPD)

城市道路是城市发展的关键，不仅支撑经济活动，还改善社会联系，推动城市化进程。中国城市道路分为快速路、主干路、次干路和支路4个等级<sup>[1]</sup>。现代道路设计强调植被搭配和地域特色，以融合城市道路与绿地。尽管如此，城市道路的生态效益功能尚未得到足够重视。城市绿地为城市生态系统提供重要生态效益，如改善空气质量、吸收CO<sub>2</sub>、雨水截留、节能和美学价值。国际上评估城市绿地生态效益的常用模型包括CITY-green<sup>[2]</sup>、InVEST<sup>[3]</sup>和i-Tree<sup>[4]</sup>。CITY-green主要利用遥感数据进行大规模生态效益评估，但不区分树种效益。2014年，赵艳玲<sup>[5]</sup>利用CITYgreen模型对上海社区绿地植物群落固碳效益进行分析，并在此基础上，从绿地植物群落的树种组成、郁闭度、层次结构、胸径、群落密度等方面研究社区绿地植物群落特征因子与固碳效益的关系。InVEST侧重于流域视角，2024年，雷馨等<sup>[6]</sup>使用InVEST模型计算得出，2000—2020年兰州市碳储量经济价值由17.8亿元增至28.1亿元，年均增长率为2.92%，呈现与碳储量相反与碳价格相同的变化趋势。i-Tree模型基于实地调查，全面评估植被生态效益。现有街道尺度生态效益研究多为定性，定量研究受限于指标选择<sup>[7]</sup>。因此，需进一步完善街道尺度的生态效益研究。

城市行道树生长受地理和人为因素威胁，特别是城市空间对其生长影响显著。对城市行道树的空间分异格局研究，常用的分析方法包括数值分类<sup>[8]</sup>、高斯曲面拟合<sup>[9]</sup>、径向采样<sup>[10]</sup>和热点分析等。其中，Getis-Ord Gi\*模型的空间热点分析能有效揭示局部空间分布<sup>[11]</sup>。地理探测器模型最初用于评估健康风险和检测潜在致病因素<sup>[12]</sup>，后应用于地球科学。模型基于空间方差分析<sup>[11]</sup>，适用于探索空间特异性，识别、解释重要驱动因子并分

析因子间关系<sup>[13]</sup>。作为城市生态系统不可分割的元素，城市行道树为人类福祉提供关键的生态系统服务，中国对城市道路生态效益的相关研究主要基于定性描述，如层次分析法和问卷调查法<sup>[14]</sup>。童丽丽<sup>[15]</sup>按照“城区—郊区—农区”生态梯度采样法，抽查了南京包括84条道路的行道树在内的多个典型样地的树种组成与树木健康状况，分析了研究区内树种的组成和群落的层次结构。结果表明，树种种类比较单一，生物多样性指数偏低。2014年，沈玲丽<sup>[16]</sup>通过对上海松江大学城7所高校行道树的调查与研究，对行道树的养护管理等问题提出了对策与建议。除此之外，中国对城市行道树树种组成、结构分析的研究还涉及许多一线城市地区，关于行道树的研究在中国逐步兴起。

银杏作为重要的子遗树种和国树，在中国林业经济和文化中占有重要地位<sup>[17]</sup>。研究通过i-Tree模型计算南京行道树的生态效益，分析了树木生态效益的空间特征及其与城市街道空间的耦合关系。利用地理探测器评估了地理因子对银杏生态效益的影响。研究结果为城市规划、道路建设和行道树种植提供了科学依据，并有助于南京银杏树的管理和维护，以及对其他城市和树种生态效益的研究。

## 1 研究地区与方法

### 1.1 研究区域

南京，地处长江下游沿海，31° 14′ — 32° 37′ N，东经118° 22′ — 119° 14′ E。该地区气候为亚热带季风。截至2021年底，南京人口约9.424亿人，城市化率86.9%。城市空间格局结合乡村、中心城区、河流开发区和城乡一体化区。本研究覆盖南京主城6个城区：玄武、鼓楼、秦淮、建邺、雨花台和栖霞区，总面积约782.86 km<sup>2</sup>。

### 1.2 样地设置

南京园林局2022年数据显示，市区园林绿地面积达17 642 hm<sup>2</sup>，绿地率和绿化覆盖率分别为39.5%和43.5%，人均公共绿地面积为10 m<sup>2</sup>/人。主要树种包括香樟(*Camphora officinarum*)、悬铃木(*Platanus acerifolia*)和银杏(*Ginkgo biloba*)，已基本形成了以主城绿地系统为核心，以明城墙、绕城公路、环城公路为边界的三个绿化环<sup>[18]</sup>。故本研究采用明城墙、内环城路和环形高速公路界定研究区内三环的界限。

本研究通过缓冲区和地理探测器分析，以新街口为中心商务区，基于城市环路划分了三个区域范围(图1)。第一环是古城墙内，人口密集且道路狭窄，古银杏树较多；第二环从古城墙外至内环高速，道路宽阔，但邻近高污染工厂；第三环则靠近长江，有大量新种植银杏树。

### 1.3 数据收集

本研究收集了南京市主城区三环内的自然地理和社会经济数据(表1)。利用ENVI Classic 5.3和ArcMap 10.6.1对主城区遥感影像数据进行预处理，包括辐射、大气校准、几何校正和影像镶嵌<sup>[19]</sup>。研究区域依据南京市主城区矢量边界确定。

### 1.4 基于i-Tree模型估算生态效益

i-Tree Eco(第6版)模型通过测树数据评估城市或农村森林的生态效益和结构。本研究基于南京市绿化园林局的行道树数据，提取胸径>5 cm的银杏树生长参数，建立数据库并导入i-Tree软件计算生态效益(总生态效益E)，输出为美元(USD)。效益包括节约能源(E1)、雨水截留(E2)、CO<sub>2</sub>吸收(E3)、空气质量改善(E4)和美学效益(E5)。南京的生

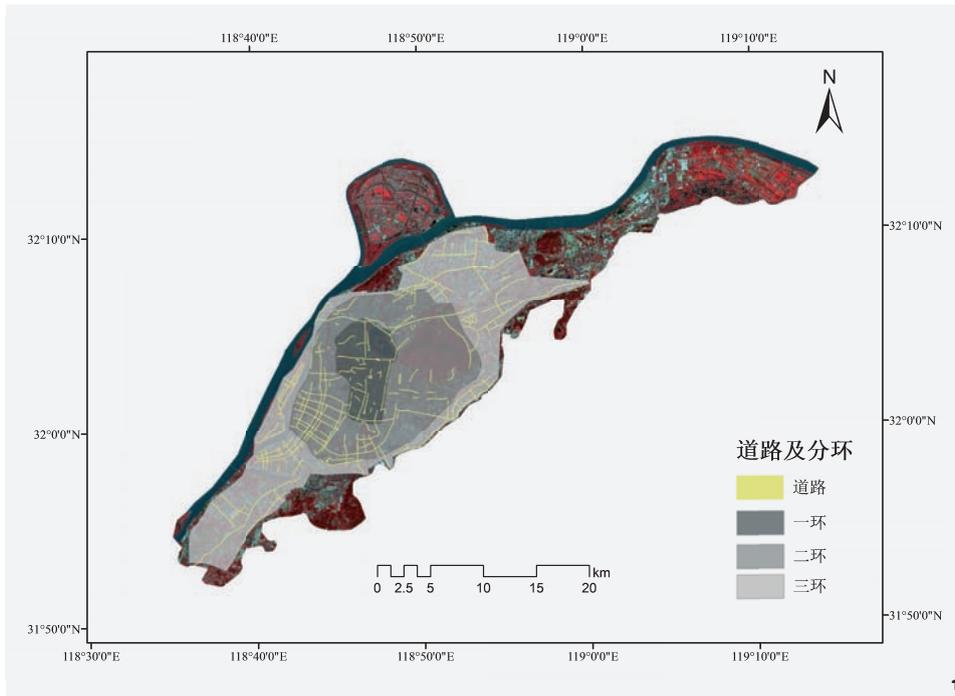


图1 南京市主干道及分环分布图  
Fig. 1 Map of Nanjing's main arterial roads and ring-road distribution

态效益估算采用沿海平原亚热带气候区参数, 表2详述了iTree Eco模型对生态效益评估的原则和气候区参数设置情况。

### 1.5 基于Getis-Ord $G_i^*$ 模型的热点分析

生态系统服务热点是指该地区生态效益价值能力较强, 冷点则是效益值较低地区。ArcGIS软件的Getis-Ord- $G_i^*$ 模块在局部水平上测量空间自相关<sup>[19]</sup>, 确定了其分布类型为集中、

分散或随机。计算见公式(1)—(3)。

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{i,j} x_j - \bar{X} \sum_{j=1}^n w_{i,j}}{S \sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n w_{i,j}^2 - (\sum_{j=1}^n w_{i,j})^2}{n-1}}} \quad (1)$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n} \quad (2)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n x_j^2}{n} - (\bar{X})^2} \quad (3)$$

表1 数据来源

Tab. 1 Data sources for this study

数据 Data	数据来源 Source of data	分辨率 /m Resolution	年份 Year
南京市主城区影像、道路宽度数据、与水体的最近距离数据	<a href="https://www.gscloud.cn/search">https://www.gscloud.cn/search</a>	1	2023
高程数据、坡度数据	NASA <a href="https://search.earthdata.nasa.gov/search">https://search.earthdata.nasa.gov/search</a>	30	2000
土壤类型数据、夜间灯光数据、GDP	Resources and Environment Science and Data Center of CAS <a href="http://www.resdc.cn/">http://www.resdc.cn/</a>	1 000	1995, 2019, 2022
人口密度数据	WorldPop <a href="https://www.worldpop.org/">https://www.worldpop.org/</a>	1 000	2022
行道银杏相关参数	<a href="https://ylj.nanjing.gov.cn/">https://ylj.nanjing.gov.cn/</a>	1	2011

注: GDP为经济生产总值, NASA为美国航空航天局, CAS为中国科学院。

式中,  $G_i^*$ 为正值显著, 表明位置*i*周围的价值相对较高, 属高值空间集聚(热点区); 反之, 如果 $G_i^*$ 为负且显著, 则表明位置*i*周围的价值相对较低, 属低值空间集聚(冷点区)。 $x_j$ 是空间要素*j*的属性值,  $n$ 是空间要素的数量即道路数量,  $w_{i,j}$ 是要素*i*和*j*之间的空间权重;  $\bar{X}$ 是所有银杏样本的生态效率的平均值。S是路上银杏树的生态效益值的方差。

### 1.6 基于Geo-detector模型的驱动因子分析

本研究利用ArcGIS和高分2号南京市遥感影像数据, 在研究区行道内生成1 300个随机采样点。对包括海拔( $x_1$ )、坡度( $x_2$ )、土壤类型( $x_3$ )、道路到水体的最短距离( $x_4$ )、归一化植被指数(NDMI) ( $x_5$ )、森林植被覆盖率(FVC) ( $x_6$ )、国内生产总值(GDP) ( $x_7$ )、人口密度( $x_8$ )、夜间灯光( $x_9$ )、道路宽度( $x_{10}$ )等10个候选因子数据进行重采样, 以匹配1 m分辨率影像。提取采样点的10个影响因子的栅格像元值, 作为地理检测器模型的输入值。 $y$ 值为iTree模型估算的行道银杏的5种生态效益值。研究以不同道路为检测单元, 统计每条道路上银杏行道树的生态效益值以 $y_i$ 表示( $i=1, 2, \dots, n$ ;  $n$ 是调查道路总数), 分析每个地理因素对生态效益的解释程度。用 $A = \{A_h\}$ 表示影响生态效益分异的因子<sup>[7]</sup>在对应随机点上的数值,

表2 i-Tree模型的5种生态效益评价原则<sup>[19-20]</sup>  
Tab. 2 The five principles of ecological benefit evaluation in the i-Tree model

生态效益类型 Ecological benefit categories	评价原则 Assessment criteria	计算公式 Calculation formula	参数设置 Parameter settings
节能效益	通过模拟树木群落对温度的影响, 评估房屋供暖和制冷需求的变化, 并将节能效益转换为货币价值	$E_s = E \times C_E = G \times C_G$ 式中, $E_s$ 为节能效益价值/¥, $E$ 为电费/(¥/kW·h), $C_E$ 为耗电量/kW·h, $C_G$ 为消耗的气体量/Therm, 1 Therm=5.5056 MJ≈2.78 m <sup>3</sup>	南京市居民用电平均价格为 0.50 ¥/kW·h, 南京市居民用天然气平均价格为 3.01 ¥/m <sup>3</sup> 。1 ¥= 0.1418 \$ (2022 年 12 月 10 日)。计算电费为 0.5 ¥/kW·h, 天然气费为 3.01 ¥/m <sup>3</sup>
雨水截留效益	树叶截留降水, 降低地表径流。年拦截雨水水量取决于树冠储存并蒸发的水量。截留效率基于当地单元对雨水收集投资的年度计算	$P = R_D \times W = V \times C_i \times Q \times W$ 式中, $P$ 为雨水截留效益值/¥, $R_D$ 为年雨水拦截总量/m <sup>3</sup> , $W$ 为地方政府资金投资/(¥/m <sup>3</sup> ), $V$ 为总研究面积/hm <sup>2</sup> , $C_i$ 为总有效防渗透率/%, $Q$ 为平均年降水量/m <sup>3</sup>	税率设置为 11.17 ¥/m <sup>3</sup> (即 1.585 ¥/m <sup>3</sup> ), 以计算最终的经济效益转换
吸收 CO <sub>2</sub> 效益	模型计算城市森林吸收碳的经济效益, 考虑直接储存的碳税和估算的间接二氧化碳减少量。使用瑞典碳排放标准税率进行计算	$P_c = C_c \times T = E_f \times F_v \times V \times T$ 式中, $P_c$ 为二氧化碳封存效益/¥, $C_c$ 为碳储存容量/kg, 1 lb≈0.4536 kg, $E_f$ 为碳存储系数/(kg/hm <sup>2</sup> ), $F_v$ 为植被覆盖率/%, $V$ 为研究区域的总面积 (hm <sup>2</sup> ), $T$ 为碳税 (\$/lb)	使用的碳封存的经济价值是瑞典碳排放标准税率为 0.1165 ¥/kg
空气质量改善效益	模型评估树木清除大气污染物的效率, 采用基于树叶污染物去除率的方法估算树木去除 NO <sub>2</sub> 、SO <sub>2</sub> 、PM <sub>10</sub> 和 VOC (挥发性有机化合物) 总量。空气质量改善效益按处理成本计算	$P_q = F \times I = V_a \times C \times I$ 式中, $P_q$ 为空气质量改善效益/¥, $F$ 为树叶去除污染物的速率/(kg/s), 等于去除污染物总量 (kg) 去除污染物所用时间 (s), $I$ 为各主要污染物处理费/(¥/kg), $V_a$ 为空气中主要污染物的沉降速率/(m <sup>3</sup> /s), $C$ 为空气中污染物的浓度/(lb/m <sup>3</sup> )	4 种主要污染物的处理费用: NO <sub>2</sub> 为 1.04 \$/lb, SO <sub>2</sub> 为 1.28 \$/lb, PM <sub>10</sub> 为 0.76 \$/lb, VOC 为 1.48 \$/lb
美学效益	模型采用支付意愿法, 并考虑了每棵树的位置因素和生长状态。树木的位置因子取决于它们所属的位置类型: 单户住宅单元 (1.00)、多户住宅 (0.75)、工业/政府/大型商业区 (0.50)、公园/开放空间/其他 (0.50) 和小型商业区 (0.66)	$P_a = A_v \times Q = \frac{T \times N \times L}{M} \times Q$ 式中, $P_a$ 为美学效益/\$, $A_v$ 为单棵树的美学价值/(\$/棵), $Q$ 为树的数量 (棵), $T$ 为这棵树增加的房地产价值增加/(¥/棵), $N$ 为树木位置因子, $L$ 为乔木叶面积年增加量	单户住宅和多户住宅之间没有区别, 树木位置因子计算约为 0.50

$h=1, 2, \dots, R$  ( $R$ 为该层含有的随机点个数)。引入 $q$ 值作为生态效益分异的决定因素, 推导出因子与生态效益值之间的空间相关性<sup>[11]</sup>, 如公式(4)所示。不同的地理驱动因子拥有不同的空间离散方式, 而不同的离散方式会对 $q$ 值产生明显影响<sup>[11]</sup>, 本研究中采用使 $q$ 值最大的离散方案作为地理探测器的参数, 其计算见公式(4)(5)。

$$q = 1 - \frac{1}{n\sigma^2} \sum_{h=1}^C n_h \sigma_h^2 \quad (4)$$

$$n = \sum_{h=1}^C n_h \quad (5)$$

式中,  $q$ 表示自变量 $x$ 对因变量 $y$ 的解释程度, 其值域为[0, 1], 并且数值越大表明解

释程度越大。 $n_h$ 和 $n$ 分别为层 $h$ 和全区的道路单元数,  $C$ 表示因子的分类数,  $\sigma_h^2$ 和 $\sigma^2$ 分别为层 $h$ 和全区的 $y$ 值方差。

## 2 结果与分析

### 2.1 行道树结构

研究区调查道路共计154条, 共包括18592株银杏, 其中一环899株, 二环6971株, 三环10722株。胸径分布如图2所示。按5cm为一个径阶组分为14组, 研究区二环内的银杏平均长势最好, 其胸径>20cm的银杏数量占总研究区内胸径>20cm的33.33%。一环内拥有较大胸径银杏, 胸径>40cm的

银杏数量占总研究区内胸径>40cm的银杏总数的74.36%。三环内的银杏胸径几乎都<30cm。

### 2.2 生态效益分析

#### 2.2.1 总效益

银杏行道树的总生态效益估算值如表3所示。其中树木的美学效益(782218\$)贡献最大, 占总效益(1018099\$)的76.83%。其次是雨水截流效益(105819\$), 占总额的10.39%。节能(91715\$)、二氧化碳封存(21891\$)和改善空气质量(16456\$)分别占总数的9.01%、2.15%和1.62%。平均生态效

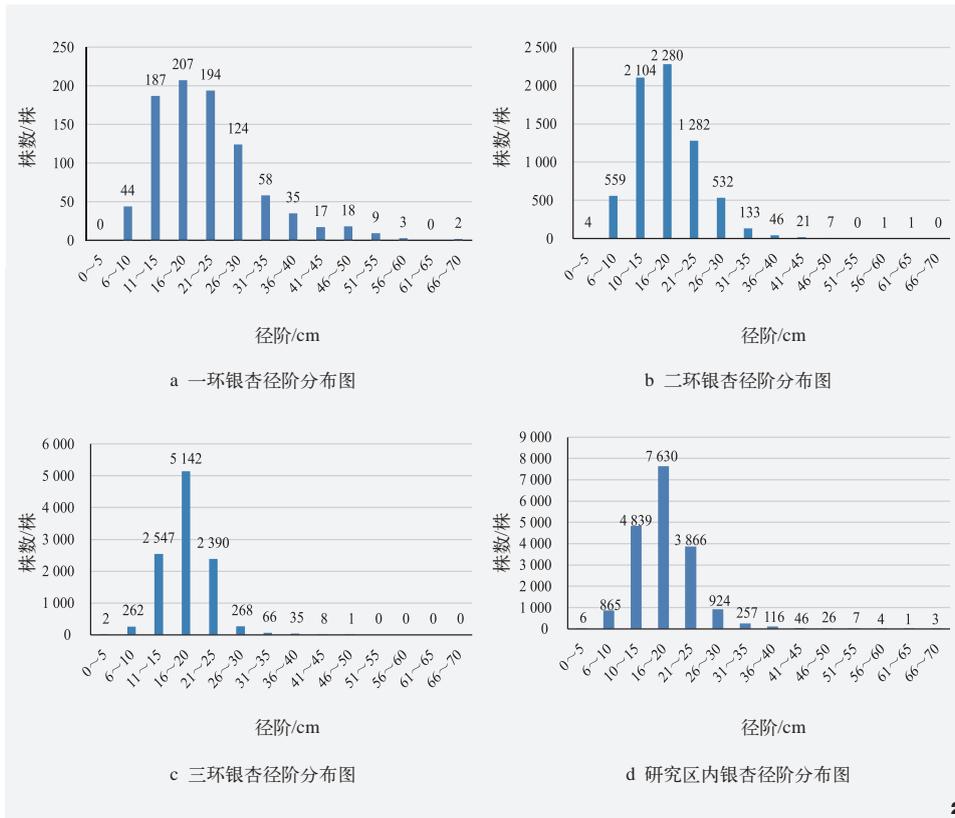


图2 研究区银杏径阶株数分布图  
Fig. 2 Distribution map of Ginkgo biloba diameter order plants in the research area

表3 行道银杏的总生态效益估算  
Tab. 3 Estimation of the total ecological benefits of street Ginkgo trees

生态效益类型 Ecological benefit categories	分区 Study zone delineation			
	研究区	一环	二环	三环
节能效益 / \$	91 715	9 753	37 481	44 481
吸收 CO <sub>2</sub> 效益 / \$	21 891	2 231	8 914	10 746
改善空气质量效益 / \$	16 456	1 766	6 731	7 959
雨水截留效益 / \$	105 819	11 778	43 588	50 453
美学效益 / \$	782 218	76 742	310 320	395 156
平均效益 / (\$/株)	62.23	60.05	67.50	58.97
总效益 / \$	1 018 099	102 270	407 034	508 795

益的排名可以表示如下：二环>一环>三环。二环银杏单株的生态效益值最高，比平均值高8.47%。第一环和第三环的值分别比平均值低3.50%和5.24%。

### 2.2.2 节能效益

行道银杏的节能效益估算值如表4所示。研究区内的全部银杏行道树每年节省3 231.3 GJ的电力，节电价值为62 837 \$。此外，还节省

了2 207.8 GJ的天然气，节气价值为28 878 \$。节能总价值为91 715 \$，每株银杏的平均年节能效益为5.61\$。研究区域的节能效益按降序排列为二环>一环>三环。

### 2.2.3 空气质量改善效益

银杏的空气质量改善效益估算值如表5所示。iTree生态模型显示，银杏行道树在研究区吸收了1 915.4 kg的O<sub>3</sub>、NO<sub>2</sub>、PM<sub>10</sub>和SO<sub>2</sub>，带来4 153 \$收益。其中，O<sub>3</sub>吸附量占66.60%。NO<sub>2</sub>、PM<sub>10</sub>、BVOC (Biogenic Volatile Organic Compounds) 和SO<sub>2</sub>排放减少4 783.2 kg，相当于12 740 \$收益，SO<sub>2</sub>减少最为显著，占66.52%。生物挥发性有机化合物 (BVOC) 产生效益为-437 \$。银杏行道树年均改善空气质量效益为16 456 \$，每株年效益1.01 \$。效益排序：三环>二环>一环。每株植物收益排序：二环>一环>三环。

### 2.2.4 吸收CO<sub>2</sub>效益

行道银杏的吸收CO<sub>2</sub>效益估算值如表6所示。研究区内银杏行道树吸收的CO<sub>2</sub>净总量为1 323 978 kg，包括379 787 kg CO<sub>2</sub>吸收量、32 897 kg CO<sub>2</sub>分解量和为节能释放的557 088 kg CO<sub>2</sub>，相当于21 891 \$的总收益。不同环内吸收CO<sub>2</sub>效益的排名为：三环>二环>一环。不同研究区域内单株银杏行道树的平均吸收CO<sub>2</sub>效益排序为：二环>一环>三环。

### 2.2.5 雨水截流效益

行道银杏的雨水截流效益估算值如表7所示。研究区内银杏行道树每年截获的降雨量为66 761 m<sup>3</sup>，产生105 819 \$的经济效益。平均而言，每株植物拦截4.08 m<sup>3</sup>的降雨，产生6.47 \$的收益。研究区内三环的总雨水截流收益排名为：三环>二环>一环。此外，

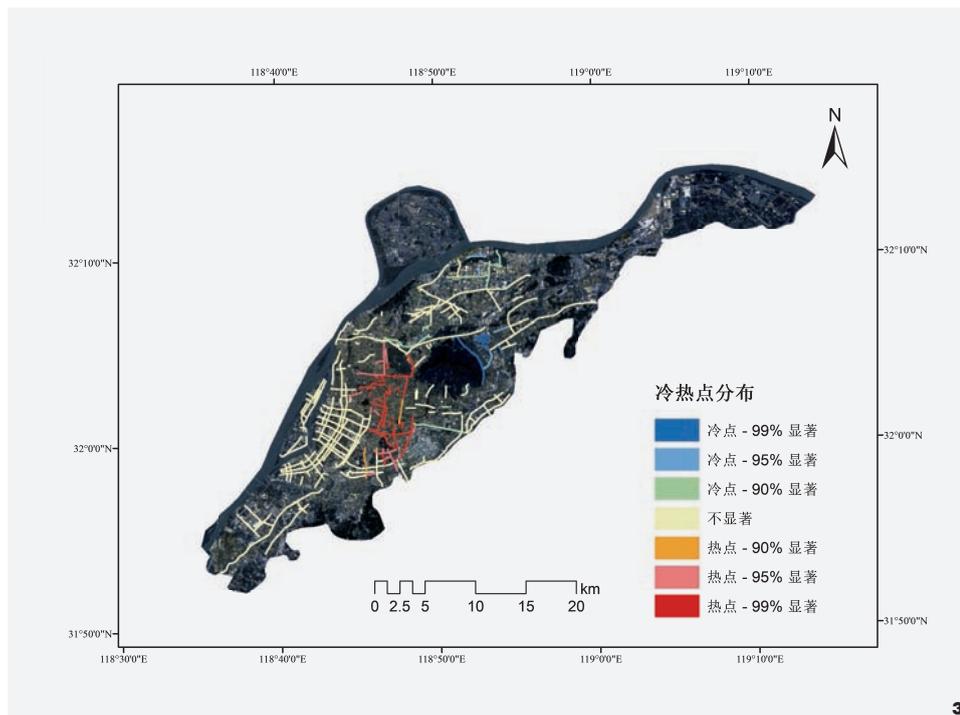


图3 研究区单株银杏年均生态效益的空间冷热点分析  
Fig. 3 Spatial hot and cold spot analysis of annual ecological benefits of individual *G. biloba* in the study area

表4 行道银杏的节能效益估算  
Tab. 4 Estimation of energy-saving benefits of street Ginkgo trees

节能效益类型 Energy-saving benefit	分区 Study zone delineation			
	研究区	一环	二环	三环
总电量 /GJ	3 231.3	346.9	1 322.3	1 562.1
电费 /\$	62 837	6 746	25 714	30 377
天然气总量 /GJ	2 207.8	229.9	899.6	1 078.3
天然气 /\$	28 878	3 007	11 767	14 104
平均值 / (\$/ 棵)	5.61	5.73	6.22	5.16
总效益 /\$	91 715	9 753	37 481	44 481

平均每株植物的雨水截流收益排名如下：二环>一环>三环。

### 2.2.6 美学效益

行道银杏的美学效益估算值如表8所示。研究区域内银杏行道树产生的美学效益价值为782 218 \$。研究区中各环的美学效益排名

为：三环>二环>一环。每株银杏的平均美学效益排名为：二环>三环>一环。

### 2.3 研究区空间热点分析

热冷点分析(图3)显示了三个研究区银杏生态效益的空间分布。一环热点主要在南部，延伸至二环。二环西部多为行道银杏，

单株效益值无明显相关性，仅东部有冷点。三环尽管单株效益值最低，但总效益最高。效益最高的道路多在二环，一环因道路短且银杏少，平均效益较低。

### 2.4 地理驱动因子分析

如图4，分别将各个地理驱动因子提取数值图层与南京市矢量边界图层进行叠置分析，得到了南京市内各个地理驱动因子展现出的不同的空间分布模式。

*q*值显示了驱动因子对银杏生态效益的解释程度。*q*值越高，则相应的地理驱动因子对生态效益的影响程度就越大。如图5，可以从不同环内各地理驱动因子的*q*值的分布统计表中获得影响银杏生态效益的显著因子。

图6对地理探测器得出的三环内银杏5类生态效益值与10个地理驱动因子之间的*q*值进行了描述性统计分析，分别计算不同因子对各生态效益*q*值的均值和方差，得出三环内各因子*q*值的统计性分布特征。通过观察，*q*值分布具有较高的集中性，体现为组内方差小。第一环内影响较显著的驱动因子对应*q*值均值排序为x10 (0.647)、x3 (0.437)、x9 (0.236)、x8 (0.195)、x7 (0.171)。其中x10和x3影响最为显著，x1、x8和x9对银杏影响较小。第二环内影响较显著的驱动因子对应*q*值均值排序为x10 (0.527)、x7 (0.154)、x1 (0.129)、x3 (0.098)、x8 (0.079)，其中x10影响程度最高。在第三环内，主要影响因子按重要性排序为：x4 (0.625)、x10 (0.605)、x6 (0.433)、x5 (0.433)、x3 (0.416)。其中x4和x10影响最为显著，x6、x5和x3对银杏影响较小。x5和x6对不同环路银杏生态效益的影响有显著差异，且对第三环影响更大。三环内x7和x9对银杏生态效益的影响较之第一、二环内更为显著。

表5 行道银杏的空气质量改善效益估算  
Tab. 5 Estimation of air quality improvement benefits of street Ginkgo trees

空气质量改善效益 Air quality improvement benefit		分区 Study zone delineation			
		研究区	一环	二环	三环
吸收量 /kg	O <sub>3</sub>	1 275.6	138.4	521.8	615.4
	NO <sub>2</sub>	131.5	14.3	53.8	63.4
	PM <sub>10</sub>	443.1	48.1	181.3	213.7
	SO <sub>2</sub>	65.2	7.1	26.7	31.4
总吸收效益 /\$		4 153	450	1 699	2 004
降解量 /kg	NO <sub>2</sub>	1 082.4	115.9	442.9	523.6
	PM <sub>10</sub>	260.5	27.9	106.7	125.9
	BVOC	258.5	27.7	105.8	125.0
	SO <sub>2</sub>	3 181.8	341.5	1 302.2	1 538.1
总降解效益 /\$		12 740	1 367	5 213	6 160
BVOC 排放量 /kg		-133.8	-15.5	-55.7	-62.6
BVOC 排放效益 /\$		-437	-51	-182	-204
总排放量		6 564.8	705.3	2 685.4	3 174.1
平均值 / (\$/ 棵)		1.01	1.04	1.12	0.92
总计 /\$		16 456	1 766	6 731	7 959

注：BVOC为生物源挥发性有机化合物。

表6 行道银杏的吸收CO<sub>2</sub>效益估算  
Tab. 6 Estimation of CO<sub>2</sub> absorption benefits of street Ginkgo trees

吸收 CO <sub>2</sub> 效益 CO <sub>2</sub> absorption benefit		分区 Study zone delineation			
		研究区	一环	二环	三环
CO <sub>2</sub> 吸收量 /kg		799 787	79 138	324 669	395 980
CO <sub>2</sub> 吸收效益 /\$		13 224	1 309	5 368	6 547
分解代谢释放 CO <sub>2</sub> 量 /kg		-25 502	-3 281	-10 592	-11 629
自身呼吸释放 CO <sub>2</sub> 量 /kg		-7 395	-757	-2 913	-3 725
自身呼吸释放 CO <sub>2</sub> 效益 /\$		-544	-67	-223	-254
间接排放 CO <sub>2</sub> 量 /kg		557 089	59 805	227 972	269 312
间接排放 CO <sub>2</sub> 效益 /\$		9 211	989	3 769	4 453
总净吸收量 /kg		1 323 978	134 905	539 135	649 938
单株平均效益 / (\$/ 棵)		1.34	1.31	1.48	1.25
吸收 CO <sub>2</sub> 总效益 /\$		21 891	2 231	8 914	10 746

### 3 讨论

#### 3.1 银杏行道树生态效益

本研究通过iTree Eco软件分析银杏树的生态效益，发现其效益顺序与熊金鑫等<sup>[21]</sup>的研究相符。生态效益贡献排序为：美学效益>雨

水截流>节能>二氧化碳吸收>空气质量改善，其中美学效益占比最高。银杏叶的形状、颜色和质地赋予了它高美学价值，使其成为城市景观美化和环境优化的优选。

iTree模型在评估改善空气质量效益时

计算了树木排放的BVOC<sup>[20]</sup>对空气质量的综合影响，指出BVOC对环境有负面影响。有研究表明全球植物每年释放的BVOCs大约为11.5×10<sup>8</sup> t，而人为VOCs年排放量仅为1.0×10<sup>8</sup> t左右，总量不到天然生物源释放量的10%<sup>[22]</sup>。植物自身释放的天然源挥发性有机化合物占全球挥发性有机化合物排放量的90%以上。因此，在评估空气质量的改善时，有必要考虑植物自身排放的化合物。本研究显示，研究区银杏BVOC排放效益为负数，证明了相关研究中银杏的BVOC排放量很小的结论<sup>[23]</sup>，同类研究也分析过水杉<sup>[22]</sup>和垂柳<sup>[24]</sup>等行道树的BVOC排放量较高，改善空气质量效益较低。银杏单株改善空气质量效益超过水杉的7倍，这也是银杏常被用来作为行道树的重要原因。

节能效益方面，建筑物附近的城市树木和其他植被可以降低夏季的室内空气温度3℃左右<sup>[25]</sup>。也有研究<sup>[26]</sup>指出，植物冬季落叶特性，可减少对阳光的阻挡，有助于节约取暖所需能源。由于研究区未涉及长江以北区域，冬季不供暖，该效益数据对节约天然气效益分析有限，对节约电费的分析未能区别降温和供暖功能，后续研究可北移以获得更多数据进行深入分析。

#### 3.2 道路宽度对生态效益的影响

地理探测器分析显示，道路宽度对树木生态效益有显著影响(*q*值均在0.5以上)。城市中树木的生存空间的地面透水性、获取的阳光和水分很大程度上受道路宽度影响<sup>[27]</sup>。特别是主城区，道路宽度直接影响树木接收到的光量和强度，进而影响植物生长。本研究显示一环区域的道路宽度对生态效益影响值最高，量化证实受限的种植空间可能给银杏带来额外挑战<sup>[28]</sup>，如土壤压实、水和养分

表7 行道银杏的雨水截流效益估算  
Tab. 7 Estimation of rainwater interception benefits of street Ginkgo trees

雨水截留效益 Rainwater interception benefit	分区 Study zone delineation			
	研究区	一环	二环	三环
总雨水截留量/m <sup>3</sup>	66 761	7 430	27 500	31 831
平均雨水截留量 (m <sup>3</sup> /棵)	4.08	4.36	4.56	3.69
平均雨水截流效益/ (\$/棵)	6.47	6.92	7.23	5.85
总雨水截流效益/\$	105 818	11 779	43 588	50 453

表8 行道银杏的美学效益估算  
Tab. 8 Estimation of aesthetic benefits of street Ginkgo trees

美学效益 Aesthetic benefit	分区 Study zone delineation			
	研究区	一环	二环	三环
平均美学效益/ (\$/棵)	47.81	45.06	51.46	45.80
总美学效益/\$	782 218	76 742	310 320	395 156

供应不足, 以及修剪需求, 可能阻碍树木生长和活力。道路宽度与街道银杏树生态效益之间的关系值得进一步研究。

### 3.3 土壤类型对生态效益的影响

地理探测器模型给出了研究区域土壤类型因子在三环内的 $q$ 值分布。研究区有8种土壤, 城市土壤占主导(80.3%), 其次是初育土, 其他类型较少, 在三个研究环带呈空间异质性分布。城市土壤中行道银杏的生态效益低于淋溶土。

一环所处的城市中央商务区是高度现代化的, 行道树大多种植在受人类活动影响的城市土壤上。这些土壤物理性质差、养分低, 导致树木生长弱, 银杏的生态效益较低。城市土壤的紧实度高, 影响了树木根系的呼吸和微生物生长, 降低了土壤物质能量循环效率, 使树木生长缓慢<sup>[28-29]</sup>。南京市主城区土壤类型分布不均, 大部分银杏种植在城市土壤中, 这使得土壤类型对银杏生态效益的影响评价具有偶然性。未来研究可扩展

至更广泛的区域, 以更全面地了解土壤类型对银杏生态效益的影响。

### 3.4 与水体的距离对银杏生态效益值的影响

研究表明, 行道银杏的生态效益受其与水体距离的影响, 尤其在三环内影响显著。河流生境对维护河流生态完整性至关重要, 对物质循环、能量流动和信息传递有显著作用。水是树木生长的关键限制因素<sup>[30]</sup>, 这与本研究的结论相符。

银杏树生长需要足够水分, 远离水源的银杏无法达到最佳状态。研究区域显示, 三环附近有大面积水域如秦淮河, 而一、二环内水域较少。城市污染和热岛效应限制了一、二环内行道树的水分获取, 影响其生态效益。三环内, 靠近水体的银杏树能获得足够水分, 而远离水体的则不能, 这使得与水体距离成为影响第三环银杏树生态效益的关键因素。然而, 这一因素的影响可能因地区而异。因此, 需根据当地条件进行具体分析, 以了解行道树生态效益的空间分布变

化。未来研究应探索行道树种植区域与水体的最适宜距离, 分析其对银杏树生态效益的影响, 为城市行道银杏种植和生境管理提供合理规划。

### 3.5 其他因素对银杏生态效益值的影响

研究表明, 在城市一、二环内, 夜间灯光、人口密度和GDP对行道银杏生态效益的影响相似且较低; 但在三环内, GDP的影响显著增强, 与其他两个因素的差距变大。夜间灯光反映人类活动, 人口密度是衡量人口集聚的关键指标<sup>[29]</sup>, 两者均能促进经济增长。城市森林对GDP和居民生活有积极影响, 促进经济发展和社区进步。本研究仅分析了GDP、夜间灯光和人口密度对银杏生态效益的影响, 未探讨具体比例关系, 后续可进一步深入研究。

NDVI和FVC对银杏生态效益的影响在三环内显著高于一环和二环, 且两者的影响水平基本一致。NDVI因其广泛的空间覆盖、高监测灵敏度和能部分消除大气辐射干扰的优点, 成为表征植被生长和覆盖度的最佳指标<sup>[31]</sup>。有研究发现NDVI和FVC之间有强线性关系<sup>[32]</sup>, 对银杏生态效益影响相似。还有研究指出潮湿环境促进植物生长, 导致更高NDVI和FVC值<sup>[20]</sup>, 这与本研究中三环内银杏样本生态效益值与NDVI、FVC相关性显著高于一环和二环内的结论一致。

## 4 结论

本研究采用i-Tree Eco模型和地理探测器模型估算了中国南京主要城区行道银杏的生态效益。结果显示行道银杏的生态效益在研究区内存在显著的空间差异, 其中美学效益、雨水截留效益和节能效益最为突出, 银杏行道树对于南京市气候生态的贡献价值

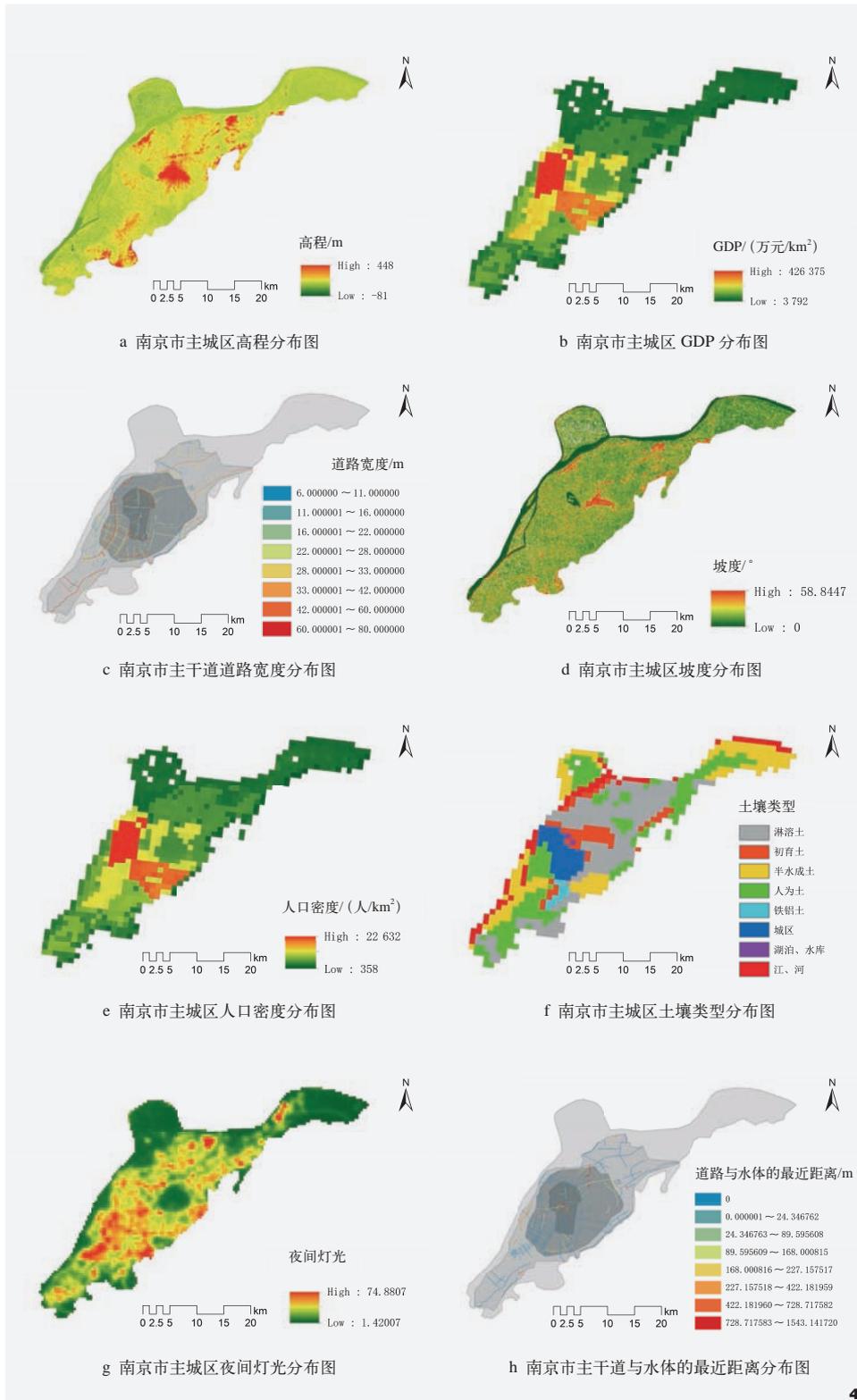


图4 南京市地理驱动因子数值分布图  
Fig. 4 Geographical driving factors distribution in Nanjing

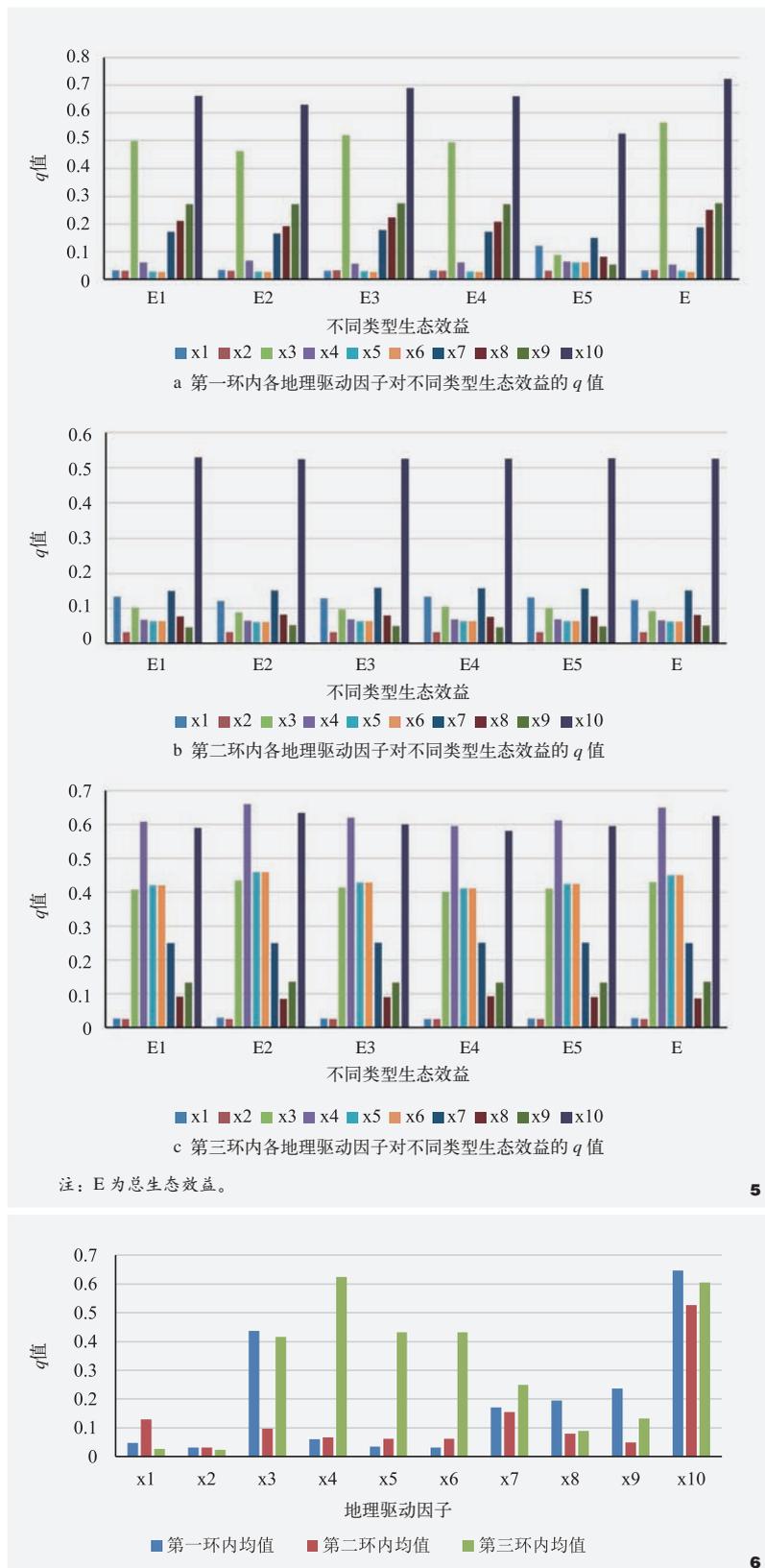
排序为：美学效益 (782 218 \$) > 截留雨水效益 (105 819 \$) > 节能效益 (91 715 \$) > 吸收CO<sub>2</sub>效益 (21 891 \$) > 改善空气质量效益 (16 456 \$)。道路宽度、土壤类型和与水体的最近距离成为影响这些价值的关键因素。较大的道路宽度和自然土壤类型有助于产生较高的生态效益值，与水体的最近距离在第三环中起着重要作用。

以上结论强调了在规划城市的绿化计划时考虑特定地点条件的重要性。为了最大限度地发挥银杏和其他行道树的生态效益，城市规划者应优先考虑具有适宜土壤条件的更宽道路，并确保其获得足够的水资源，尤其是在新开发的地区。未来的研究应进一步探索各种环境因素与树木生态效益之间复杂的相互作用，以改进城市林业实践并促进可持续城市发展。

注：文中图表均由作者绘制。

#### 参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市道路工程设计规范: CJJ 37-2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [2] CARVER A D, UNGER D R, PARKS C L. Modeling Energy Savings from Urban Shade Trees: An Assessment of the CITYgreen® Energy Conservation Module[J]. Environmental Management, 2004, 34(5): 650-655.
- [3] SHARP R, RICKETTS T, GUERRY A D, et al. InVEST 3.2.0 Beta User's Guide[EB/OL]. Stanford: The Natural Capital Project, 2015[2026-01-20]. <https://storage.googleapis.com/releases.naturalcapitalproject.org/invest-userguide/latest/en/index.html>.
- [4] ROY S, BYRNE J, PICKERING C. A Systematic Quantitative Review of Urban Tree Benefits, Costs, and Assessment Methods Across Cities in Different Climatic Zones[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2012, 11(4): 351-363.
- [5] 赵艳玲. 上海社区绿地植物群落固碳效益分析及高固碳植物群落优化[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.



5

6

[6] 雷馨, 海新权. 耦合PLUS-InVEST模型的兰州市土地利用变化及碳储量经济价值估算[J]. 地理科学, 2025, 45(2): 339-348.

[7] HAN J J, WANG J P, CHEN L, et al. Driving Factors of Desertification in Qaidam Basin, China: An 18-year Analysis Using the Geographic Detector Model[J]. Ecological Indicators, 2021, 124: 107404.

[8] SHEN H F, HUANG L W, ZHANG L P, et al. Long-term and Fine-scale Satellite Monitoring of the Urban Heat Island Effect by the Fusion of Multi-temporal and Multi-sensor Remote Sensed Data: A 26-year Case Study of the City of Wuhan in China[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 172: 109-125.

[9] QUAN J L, CHEN Y H, ZHAN W F, et al. Multi-temporal Trajectory of the Urban Heat Island Centroid in Beijing, China Based on a Gaussian Volume Model[J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 149: 33-46.

[10] QIAO Z, WU C, ZHAO D Q, et al. Determining the Boundary and Probability of Surface Urban Heat Island Footprint Based on a Logistic Model[J]. Remote Sensing, 2019, 11(11): 1368.

[11] WANG J F, LI X H, CHRISTAKOS G, et al. Geographical Detectors-Based Health Risk Assessment and Its Application in the Neural Tube Defects Study of the Heshun Region, China[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(1): 107-127.

[12] HUA D, HAO X M. Spatiotemporal Change and Drivers Analysis of Desertification in the Arid Region of Northwest China Based on Geographic Detector[J]. Environmental Challenges, 2021, 4: 100082.

[13] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.

[14] 鲁敏, 赵鹏, 王菲, 等. 城市绿道综合效能评价研究——以济南市为例[J]. 山东建筑大学学报, 2016, 31(2): 109-118.

[15] 童丽丽. 南京城市森林群落结构及优化模式研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2007.

[16] 沈玲丽. 上海松江大学城七所高校行道树调查与研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.

[17] 陈乐, 李邨, 姚尧, 等. 人口集聚对中国城市经济增长的影响分析[J]. 地理学报, 2018, 73(6): 1107-1120.

[18] 姚亦锋. 南京城市地理变迁及现代景观[M]. 南京: 南京大学出版社, 2006.

[19] 张婧文. 基于i-Tree模型的淄博人民公园植物群落及生态效益研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2022.

[20] 刘小刚, 冷险险, 孙光照, 等. 基于1961-2100年SPI和SPEI的云南省干旱特征评估[J]. 农业机械学报, 2018, 49(12): 236-245.

[21] 熊鑫鑫, 祁慧君, 王倩茹, 等. 基于i-Tree模型的城市小区行道树生态效益评价[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2019, 43(2): 128-136.

图5 研究区三个环带生态效益值与q值的相关性分析结果图  
Fig. 5 Correlation analysis results of ecological benefit values and q values within three rings

图6 研究区三个环带q值的统计性分布图  
Fig. 6 Statistical distribution diagram of q-values in the three concentric zones of the study area

- [22] AHN J W, DINH T V, PARK S Y, et al. Characteristics of Biogenic Volatile Organic Compounds Emitted from Major Species of Street Trees and Urban Forests[J]. Atmospheric Pollution Research, 2022, 13(7): 101470.
- [23] LIU L P, SEYLER B C, LIU H F, et al. Biogenic Volatile Organic Compound Emission Patterns and Secondary Pollutant Formation Potentials of Dominant Greening Trees in Chengdu, Southwest China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2022, 114: 179-193.
- [24] 朱轶梅. 亚热带城乡区域植物源VOC排放的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [25] ZHAO H Y, ZHAO D L, JIANG X, et al. Assessment of Urban Forest Ecological Benefit Based on the I-tree Eco Model—A Case Study of Changchun Central City[J]. Forests, 2023, 14(7): 1304.
- [26] 张玉阳, 周春玲, 董运斋, 等. 基于i-Tree模型的青岛市南区行道树组成及生态效益分析[J]. 生态学杂志, 2013, 32(7): 1739-1747.
- [27] TAN X Y, SHIBATA S. Factors Influencing Street Tree Health in Constrained Planting Spaces: Evidence from Kyoto City, Japan[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2022, 67: 127416.
- [28] 郝光发, 彭镇华, 王成. 北京城区银杏行道树生长现状与健康状况研究[J]. 林业科学研究, 2013, 26(4): 511-515.
- [29] LEVIN N, KYBA C C M, ZHANG Q L, et al. Remote Sensing of Night Lights: A Review and an Outlook for the Future[J]. Remote Sensing of Environment, 2020, 237: 111443.
- [30] XI B Y, BLOOMBERG M, WATT M S, et al. Modeling Growth Response to Soil Water Availability Simulated by HYDRUS for a Mature Triploid Populus Tomentosa Plantation Located on the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2016, 176: 243-254.
- [31] CHEN C, PARK T, WANG X H, et al. China and India Lead in Greening of the World Through Land-use Management[J]. Nature Sustainability, 2019, 2(2): 122-129.
- [32] 张斯琦, 陈辉, 宋明华, 等. 2000-2015年柴达木盆地植被覆盖度时空变化及其与环境因子的关系[J]. 干旱区地理, 2019, 42(5): 1124-1132.

## 2026年《园林》学刊专题征稿

为紧贴时代脉搏, 凸显时代主题, 集中展示中国风景园林标志事件和新时代重大规划, 同时本着开放办刊、专题提前策划的工作方针, 2026年《园林》学刊拟推出如下专题(所列专题顺序, 不作为最终发刊专题顺序):

- (1) 老年友好绿地; (2) 乡村景观游憩与感知; (3) 生态智慧与智慧景观; (4) 城乡融合下的棕地再生; (5) 流变中的风景遗产; (6) 城市更新与景观评估; (7) 小微湿地与城乡绿色发展; (8) 康养景观机制与路径; (9) 生态教学与自然教育; (10) 自然保护地的多重福祉; (11) 城市蓝绿空间生态效应评价; (11) 历史公园遗产多维阐释; (13) 全龄友好型福祉环境。

专题文章采用学术主持人组稿与作者自由来稿相结合的方式。稿件具体要求可关注“园林杂志”公众号。

